

基于 OISL-OSU 的卫星光网络弹性传输技术研究

王庆福¹, 郭伟^{2*}, 冯英伟²

(1. 辽宁行政学院, 沈阳 110161; 2. 河北建筑工程学院, 河北 张家口 075000)

摘要:为解决卫星光网络承载细粒度业务时延不确定、资源利用率低的问题,提出基于光业务单元(OSU)的OISL(OISL-OSU)弹性传输技术。该技术通过OSU映射复用实现业务灵活切片,设计RS(255, 223)编码增强信道可靠性,并基于仿真与现有方案对比验证。结果表明:68~1 522 B帧长下,单节点时延降低44.99%~58.26%,抖动抑制12.50%~62.50%,短帧吞吐量显著提升,有效增强了卫星光链路硬管道隔离与确定性传输能力。

关键词:卫星光网络;弹性光管道;分组交换;时延优化

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)02-0109-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.02.018

Research on elastic transmission technology for satellite optical networks based on OISL-OSU

WANG Qingfu¹, GUO Wei^{2*}, FENG Yingfei²

(1. Liaoning Academy of Governance, Shenyang 110161, China; 2. Hebei University of Architecture, Zhangjiakou Hebei 075000, China)

Abstract: To address the issues of uncertain latency and low resource utilization when satellite optical networks carry fine-grained services, an elastic transmission technology based on optical service unit(OSU) for inter-satellite laser links(OISL-OSU) is proposed. This technology achieves flexible service slicing through OSU mapping and multiplexing, designs RS(255, 223) coding to enhance channel reliability, and verifies performance through simulations and comparisons with existing schemes. Results show that for frame lengths ranging from 68 to 1 522 bytes, single-node latency is reduced by 44.99%~58.26%, jitter suppression reaches 12.50%~62.50%, and throughput for small frames is significantly improved. This effectively enhances the hard pipe isolation and deterministic transmission capabilities of satellite optical links.

Key words: satellite optical network, elastic optical links, packet switching, latency optimization

0 引言

随着天地一体化信息网络建设的推进,卫星光网络已成为实现全球无缝覆盖的关键基础设施。然而,受限于星上资源,卫星光网络中的星间链路及星地链路带宽难以达到地面光纤的水平,且链路扩容极为困难^[1-4]。当前,采用基于星间激光链路(OISL)的星上因特网协议(IP)分组交换(OISL-IPoC)技术实现星上IP

分组交换,是目前主流的卫星互联网承载与组网方案^[5-6]。但随着细粒度业务的快速增长,其基于IP承载的局限性日益凸显:首先,细粒度业务易引发流量拥塞,导致业务传输路径不可控、隔离性差及端到端时延不确定,严重降低网络性能^[7];其次,业务增长使得管控层的资源协调复杂度急剧上升;再次,OISL-IPoC缺乏开销信息传递机制,无法打通物理层、应用层与网管层,难以构建基础的智能网络架构^[8];最后,基于该技术实现的卫星光网络无法与地面光传输网(OTN)互联互通^[9]。上述问题表明,现有的卫星光网络承载技术已难以满足未来高价值业务对确定性传输的需求。

相较于IP组网,OTN具备灵活的光电混合交换特点。特别是基于光业务单元(OSU)的城域优化型光传输网(M-OTN)技术,支持2 Mb/s~100 Gb/s带宽、硬管道隔离及确定时延传输,兼容多种专用网络体制^[10]。

收稿日期:2025-04-08。

作者简介:王庆福(1979—),男,硕士,副教授,主要从事计算机应用技术、网络通信、物联网和大数据等方面研究工作。主持和参与省级课题多项,发表学术论文多篇。

***通信作者:**郭伟(1979—),女,硕士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为信号与智能信息处理、光通信技术、信息分析与预测等。



王庆福,郭伟,冯英伟:基于 OISL-OSU 的卫星光网络弹性传输技术研究

近年来,学术界围绕 OSU 特性开展了一系列研究,包括基于数模协同的光信噪比预测流程、专线业务资源分配算法^[11],以及结合量子密钥分发(QKD)的安全传输^[12]和服务质量(QoS)优化技术^[13-14]等。这些研究证实了 OSU 在多颗粒度业务传输、物理层带宽保证及频谱优化方面的天然优势。然而,如何将 OSU 技术与弹性光管道技术相结合,应用于卫星光网络以构建具备硬管道隔离、时延抖动保证及高可扩展性的确定性网络,仍是当前亟待解决的问题。

针对上述挑战,本文提出一种 OISL-OSU 技术,旨在为高价值场景业务提供具备带宽、时延、可靠性和安全隔离能力的确定性卫星光网络。

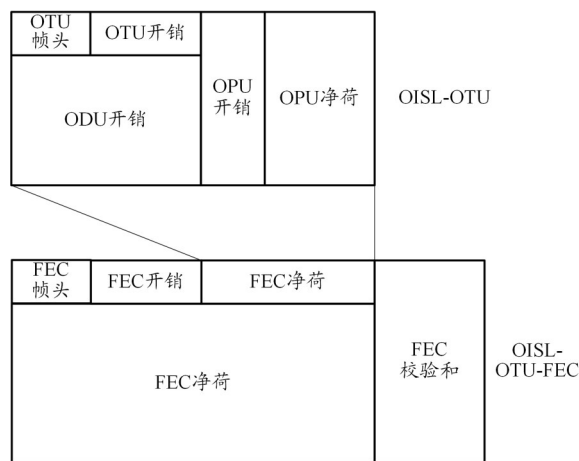
1 OISL-OSU 技术原理与架构设计

1.1 技术原理与业务切片

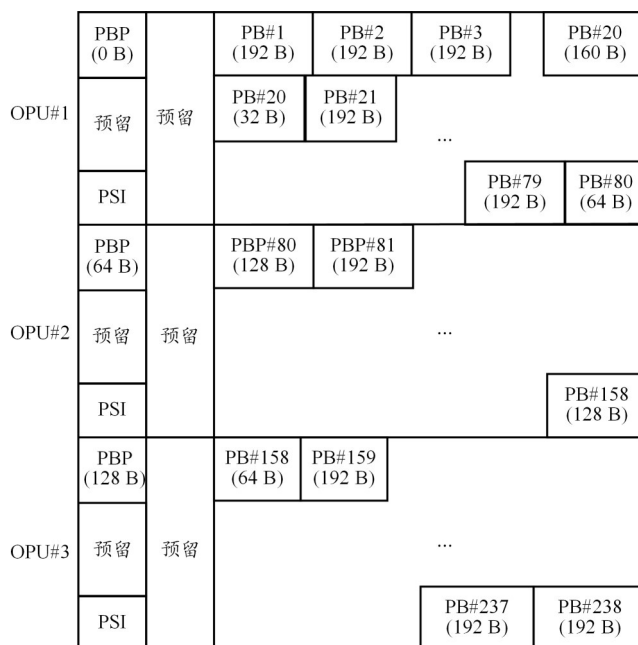
OISL-OSU 业务切片技术通过 OSU 的映射与复用方式,实现对业务的灵活切片适配和交叉连接^[15]。OSU 基于 ITU-T G.709 标准扩展^[16],通过在光信道净荷单元(OPU)的净荷上抽象出一层容器,可承载各类固定速率(CBR)和可变速率(VBR)业务^[10]。OSU 通过端到端容器直通、多容器绑定与刚性管道预留、动态带宽调整及容器隔离机制,能够为星上业务提供硬隔离、高安全、低时延和弹性带宽传输能力。

1.2 物理层帧结构设计

OISL 物理层接口开销包含前向纠错(FEC)开销、光传输单元(OTU)开销、光通道数据单元(ODU)开销和 OPU 开销。OISL-OTU-FEC 帧用于封装 FEC 编码,本文设计了基于 RS(255, 223)编码构造的 FEC 帧结构,由 FEC 帧头、FEC 开销、FEC 净荷和 FEC 校验和等组成,如图 1(a)所示。其中,OISL-OTU 帧为固定长度帧结构,包含 OTU 开销和净荷。OISL-ODU 帧封装于 OISL-OTU 帧中,包含 ODU 开销和 OISL-OPU 帧。OISL-OPU 帧包含 OPU 开销和 OPU 净荷。通过将 OSU 映射/复用到 OPU 净荷,实现 OSU/ODU 层间适配,完成 OSU 业务到线路侧的传输。每个 ODU 支持的 OSU 链接数量受净荷(P)值、支路端口号(TPN)长度值、ODU 复用级数等因素影响。OSU 承载业务映射层次少,单点时延可达微秒级抖动,可实现业务确定性低时延传输。每个 OPU 的净荷块(PB)大小为 192 B,OPU 净荷从一个 OPU 帧的第 1 行第 17 列开始被划分为多个 PB,1 个 PB 跨越 2 个连续的 OPU 帧。图 1(b)为将 OPU 净荷划分为连续多个 PB 的示例。其中,PBP 为净荷块指针,PSI 为净荷结构识别。



(a) OISL-OTU-FEC 帧结构



(b) 基于 PB 的 OISL-OPU 帧结构

图 1 OISL-OSU 帧结构示意图

1.3 信道编码与纠错机制

本文根据业务与信道特性,选择了 RS(255, 223)编码交织方式。在 FEC 处理过程中,OISL-OTU-FEC 帧的每行数据按字节间插方式被分为 16 个子行,每 1 个 FEC 编解码器处理其中 1 个子行。16 个子行 RS 交织编码示意图如图 2 所示。其中,FF 表示进制 0xFF;1 行 OISL-OTU-RS 数据中属于 FEC 子行 X 的字节序号是 $X + 16(i - 1)$, i 为生成多项式的项次索引, $i=1, 2, \dots, 255$ 。

RS 编码与交织原理如下:将 16 个连续的 RS(255, 223)码字依次去除前 5 个固定开销符号(0xFF),每个码字保留 250 个有效符号。随后按字节交织深度 16 进行矩阵映射:将第 1, 17, 33, \dots , 241 个符号排为第 1

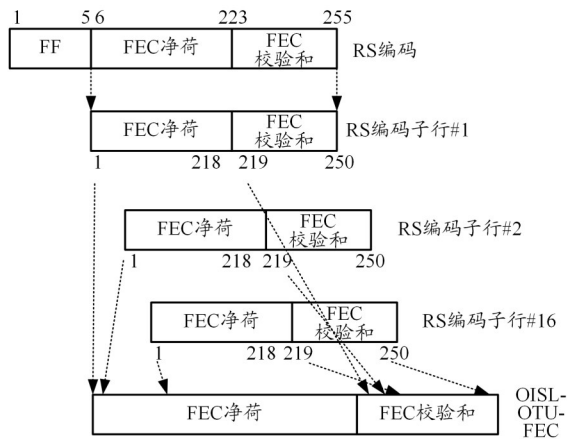


图2 16子行RS编码示意图

行,第2,18,34,⋯,242个符号排为第2行,依此类推至第16行。每条子行长度为250个符号,其中包含218个FEC净荷符号与32个FEC校验符号。该结构可将信道突发错误分散至多个独立码字,显著提升译码容错能力。

在OISL中,由于激光通信终端的移动存在固定步长精度,属于不稳定信道。RS译码器接收到的数据有一定概率会连续出现数十个符号的误码。RS(255,223)的交织深度为32,这些连续误码会被分配到32个RS码字中进行译码;而现有空间数据系统咨询委员会(CCSDS)组网协议的交织深度仅为4,每个RS码字需承担更多的错误字节,译码失败的概率更大。

经过交织和RS(255,223)编码后的不可纠正的误码率(有效误码率)^[17]为

$$p_{\text{eff}} = \sum_{i=t+1}^D \binom{D}{i} p_b^i (1-p_b)^{D-i} \quad (1)$$

式中: t 为RS码的最大可纠正错误数(纠错能力), D 为交织深度, p_b 为原始信道(未经过纠错)的误比特率。

本文设计的RS(255,223)参数如表1所示。

表1 RS(255,223)参数

参数项	说明
单RS码字纠错能力	16个RS符号
本原多项式	$F(x) = x^8 + x^7 + x^2 + x + 1$,属于 $GF(2^8)$ 域
生成多项式	$g(x) = \prod_{j=112}^{143} (x - \alpha^{11j}) = \sum_{i=0}^{32} G_i x^i$, 其中 α^{11} 为本原元

注:GF表示伽罗瓦域, j 表示生成多项式的根的索引。

1.4 业务映射与速率适配

OISL-OSU将ODU的帧结构分解,形成多个PB,每个OSU占用PB对的数量为一个或者多个。引入灵活映射的OSU,可以对PB带宽灵活设置,通过PB带宽实现OSU可支持客户业务最小颗粒度设计,基于OSU承载容器具备对10 Mb/s~10 Gb/s级粒度多业务的高效承载能力。OSU比特速率与传输的分组业务类型有关。客户端信号首先映射到OSU,然后通过光业务支路单元(OSTU)结构复用到OPU帧中。OSTU结构由 p 个连续OPU PB块的传输周期中的 C 个PB块组成。最大 C 值(以PB块为单位)确定了每个特定客户端服务的最大OSU比特率。在OISL-OSU PB基准带宽(R_{PB})为2.6 Mb/s条件下,不同OPU k 对应的 P 值、PB值^[10]如表2所示。

表2 不同OPU k 对应的 P 值、PB值

OPU类型	OPU净荷比特速率 $R_{\text{OPU_PLD}}/(\text{kb/s})$	P 值	PB值/(Mb/s)
OPU0	1 238 954.310	476	2.602 845 189
OPU2	9 995 276.962	3 840	2.602 936 709
OPU4	104 355 975.330	40 096	2.602 653 016

2 仿真实验与性能评估

2.1 仿真场景与平台搭建

卫星光网络仿真拓扑结构如图3所示。该网络拓扑主要参考北斗系统星座设计,为便于仿真验证,本文选取了由空间段、地面段和用户段组成的网络,共计38个节点^[18]。其中,空间段由位于倾斜地球同步轨道(IGSO)、中地球轨道(MEO)和低地球轨道(LEO)的共35颗卫星组成;地面段和用户段由3个地面网关节

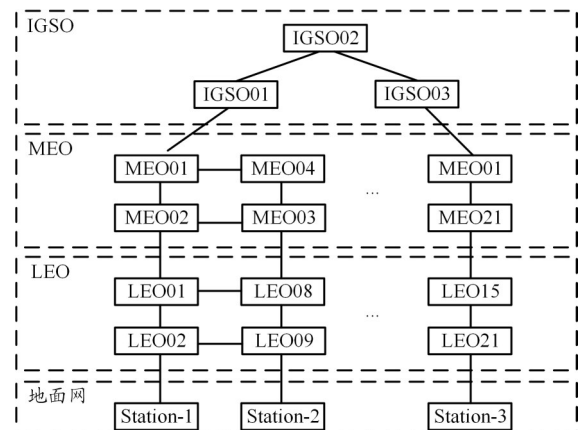


图3 卫星光网络仿真拓扑图

王庆福,郭伟,冯英伟: 基于 OISL-OSU 的卫星光网络弹性传输技术研究

点 (Station-1、Station-2、Station-3) 及用户终端组成。IGSO、MEO 和 LEO 卫星各自形成 1 个环网,同轨相邻卫星节点之间、跨轨卫星节点之间至少存在 2 条 OISL (如 IGSO-01 与 MEO-01、MEO-02 与 LEO-01), OISL 均为双向全双工链路。星座仿真参数如表 3 所示。此外,地面网站点通过激光链路 with IGSO、LEO 卫星进行通信 (如 Station-1 与 IGSO-01、Station-1 与 LEO-04)。其中,每条激光链路的带宽为 10.709 Gb/s。

表 3 星座仿真参数

链路类型	最小距离/km	最大距离/km	链路带宽/Gb/s
GEO-GEO	21 752	42 168	10.709
GEO-MEO	16 258	84 314	10.709
MEO-MEO	1 200	48 756	10.709
MEO-LEO	20 978	64 712	10.709
LEO-LEO	50	2 412	10.709

为了验证组网协议与路由策略的功能需求,并构建更接近真实星上运行环境的测试条件,本文设计了卫星光网络半实物仿真实验平台,如图 4 所示。其中,图 4(a) 为控制平面与数据平面的实物图:控制平面由控制节点 SCID-101 (Station-1)、SCID-1 (IGSO-01)、SCID-2 (IGSO-02) 组成;数据平面由交换节点 SCID-101、SCID-1、SCID-2 组成。控制平面与数据平面之间通过南向接口交互控制命令和网络状态,控制平面则通过北向接口与管理平面交互数据。仿真实验平台中管理平面、控制平面和数据平面的拓扑关系如图 4(b) 所示。仿真软件环境与硬件配置如表 4 所示^[9]。

2.2 性能测试结果与分析

在仿真实验平台中,本文采用 VIAVI MTS-5800

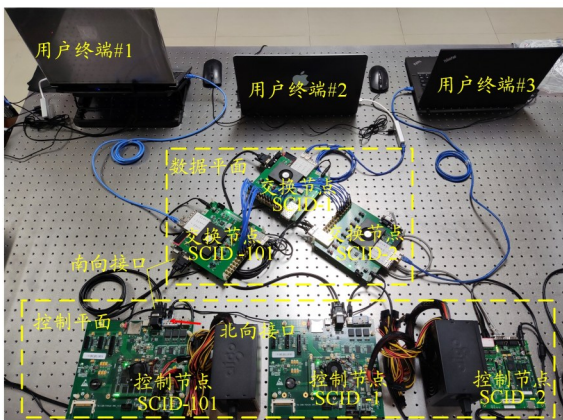
表 4 仿真软件/硬件配置

平面	节点	软件	硬件
数据平面	虚拟节点	Intel Windriver VxWorks 6.9	Intel Core i7
	真实节点	Vivado 2022.1	Xilinx 7V690T (Serdes: GTH 12.8 Gb/s)
控制平面	虚拟节点	Intel Windriver VxWorks 6.9	Intel Core i7
	真实节点	Intel Windriver VxWorks 6.9	PowerPC2020
管理平面	—	Java jre1.8.0	Intel Core i7

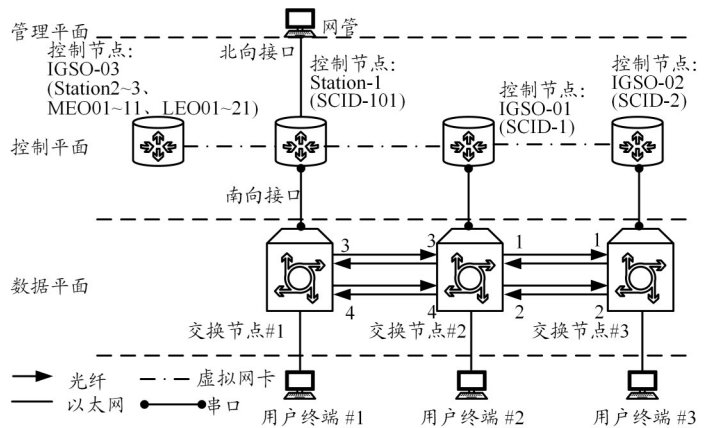
网络测试仪,依据征求意见稿(RFC) 2544 测试标准,对 OISL-IPoC 与 OISL-OSU 技术方案进行 1 000 Mb/s 以太网端到端业务性能对比测试。在零丢包率条件下,评估了 2 种方案的吞吐量、环路时延及帧抖动性能,测试结果分别如图 5、图 6 所示。

由图 5 可知,当以太网帧长为 68~1 522 B 时,OISL-OSU 与 OISL-IPoC 在 OSI 参考模型第 1 层(L₁,物理层)至第 4 层(L₄,传输层)的吞吐量测试范围分别为 1 000.00~338.70 Mb/s 和 1 000.00~311.44 Mb/s。其中,L₁层吞吐量反映物理层线速,未计入上层协议开销,故恒定为 1 000 Mb/s;而 L₄层吞吐量需扣除传输控制协议/因特网协议(TCP/IP)等协议头部开销,导致有效数据吞吐量降低。此外,对于长帧传输,L₄层吞吐量相对更高,这是由于较大帧长降低了协议头的相对开销占比,从而提升了传输效率。

在承载短帧业务(帧长为 68 B 和 132 B)时,OISL-OSU 的吞吐量优于 OISL-IPoC。对于 68 B/132 B 短

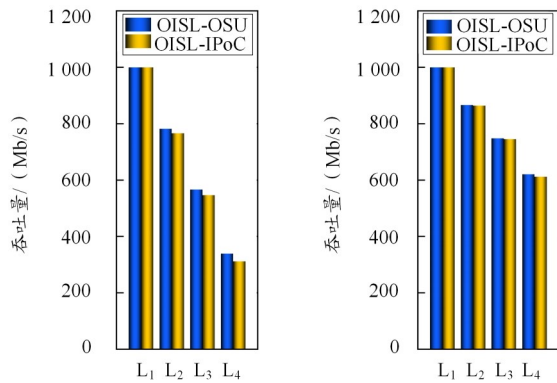


(a) 实物图



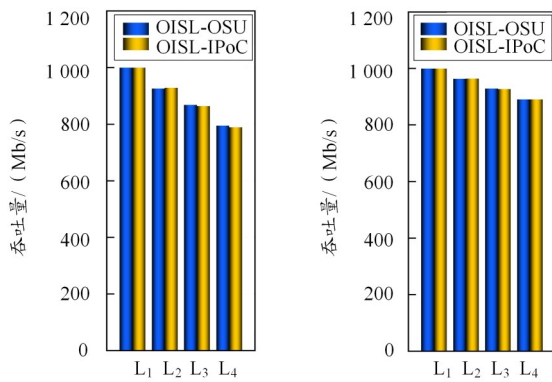
(b) 网络拓扑

图 4 仿真实验平台



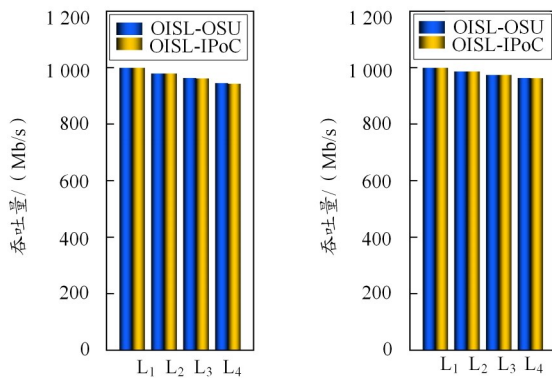
(a) 68 B 帧

(b) 132 B 帧



(c) 260 B 帧

(d) 516 B 帧



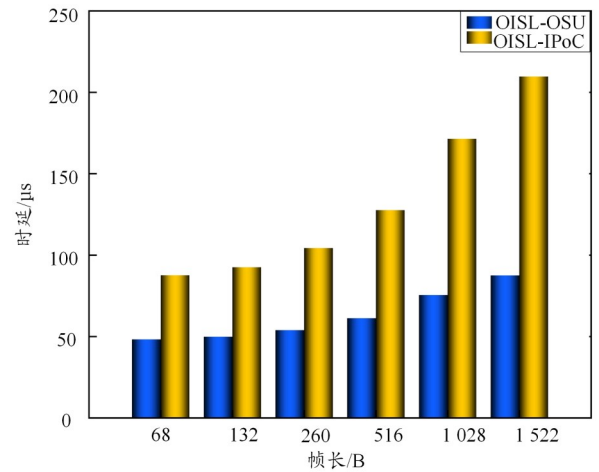
(e) 1028 B 帧

(f) 1552 B 帧

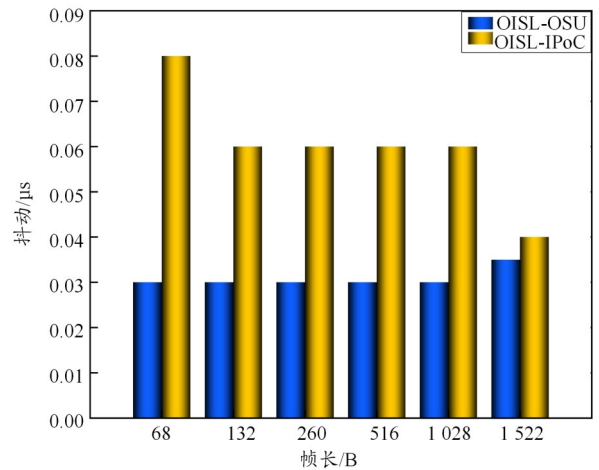
图5 OISL-OSU与OISL-IPoC吞吐量性能对比

帧, OISL-OSU支持多业务聚合机制(如将多个短帧封装至同一OPU净荷),显著降低了单帧的开销占比;而OISL-IPoC需对每个短帧独立封装标签,导致协议开销占比相对较高,从而限制了吞吐量性能。

在时延性能方面, OISL-OSU采用硬管道时隙复用机制,将业务直接映射至OPU净荷,避免了多层协议的封装/解封装处理。而OISL-IPoC需在每个传输节点查询标签转发信息库(LFIB),并执行标签交换操



(a) 时延



(b) 抖动

图6 OISL-OSU与OISL-IPoC时延和抖动性能对比

作(置换/压入/弹出);随着网络路由条目规模的扩大, LFIB表项增多,查询时延相应增加。因此, OISL-OSU通过简化封装层级与固定头部开销,显著降低了传输时延。

从图6(a)可以看出,当以太网帧长为68、132、260、516、1028、1522 B时,相较于OISL-IPoC, OISL-OSU的单节点处理时延分别降低了44.99%、46.16%、48.31%、52.00%、55.96%和58.26%。这一时延优势使OISL-OSU更适用于时延敏感型业务场景(如实时遥测、工业控制等)。

相比之下, OISL-IPoC的端到端时延主要取决于卫星网络跳数与路由表规模。虽然OISL-IPoC可通过QoS优先级调度机制降低高优先级业务的排队时延,但在大规模卫星组网场景下,多跳转发与标签处理累积的时延仍相对较高。

此外, OISL-OSU通过硬管道时隙复用机制提供

王庆福,郭伟,冯英伟:基于 OISL-OSU 的卫星光网络弹性传输技术研究

确定性时延传输,有效抑制了数据包抖动,使其更适用于时延敏感型业务(如实时控制、精密遥测等)。而在 OISL-IPoC 协议中,数据包抖动受网络拥塞状态与流量调度策略影响显著;虽然可通过 QoS 优先级机制优化高优先级业务的抖动性能,但在高负载场景下,统计复用导致的排队时延波动仍会使抖动显著增加。抖动仿真结果如图 6(b)所示。可以看出,当以太网帧长为 68、132、260、516、1 028、1 522 B 时,相较于 OISL-IPoC, OISL-OSU 的帧抖动分别降低了 62.50%、50.00%、50.00%、50.00%、50.00% 和 12.50%。抖动抑制效果在短帧场景下尤为显著,这主要得益于 OISL-OSU 的刚性管道隔离机制避免了业务流间的竞争排队,从而消除了由拥塞引起的时延抖动。

3 结束语

本文提出的 OISL-OSU 技术在吞吐量、时延及抖动等关键性能指标上均优于 OISL-IPoC 方案,尤其适用于未来第六代移动通信(6G)网络中对实时性要求严苛的业务场景。OISL-OSU 具备硬管道隔离、确定性时延传输及高可靠性等特性,契合 6G 网络关于空天地一体化、工业互联网及沉浸式通信的严苛需求。该技术在高频金融交易(微秒级时延敏感)、工业自动化(确定性时延需求)、超高清视频传输(低抖动保障)等专业场景具有广阔应用前景,有望成为构建 6G 网络的核心传输技术之一。

参考文献:

- [1] Medowell J C. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX Starlink constellation[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2020, 892(2): L36.
- [2] Mróz P, Otarola A, Prince T A, et al. Impact of the SpaceX Starlink satellites on the Zwicky transient facility survey observations[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2022, 924(2): L30.
- [3] Hapgood M, Liu H, Lugaz N. SpaceX—Sailing close to the space weather? [J]. Space Weather, 2022, 20(3): e2022SW003074.
- [4] Heldmann J L, Marinova M M, Lim D S S, et al. Mission architecture using the SpaceX starship vehicle to enable a sustained human presence on Mars[J]. New Space, 2022, 10(3): 259–273.
- [5] Blue Book CCSDS 702.1-B-1 P over CCSDS Space Links[S].
- [6] Wu Kankan, Dang Jiancheng, Li Linwei, et al. Design of space link IP network protocol based on USLP[C]//2023 2nd International Symposium on Aerospace Engineering and Systems (ISAES), 2023: 1–7.
- [7] Zhang Yu, Yuan Yabo, Guo Bingli, et al. A research study on protocol stack of space-based optical backbone network[J]. Applied Sciences, 2021, 11(5): 2367.
- [8] Huang Shanguo, Guo Bingli, Yuan Yabo, et al. Control and Management of Optical Inter-Satellite Network based on CCSDS Protocol[C]//2020 European Conference on Optical Communications (ECOC), 2020: 1–3.
- [9] 周伟. 卫星光网络组网协议与路由算法研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2023: 30–38.
- [10] YD/T 4855-2024 光业务单元(OSU)技术要求[S].
- [11] 瞿子皓. 基于光业务单元的资源分配技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023: 19–26.
- [12] Zhou W, Guo B, Cao B, et al. Research on key technologies of quantum-safe metro-optimized optical transport networks[J]. Applied Sciences, 2025, 15(5): 2809.
- [13] 李卓桐. 面向云网融合的软件定义光业务网关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2024: 33–40.
- [14] Liu Wenhong, Zhao Yongli, Lian Meng, et al. Adaptive service-aware fault management method based on bandwidth compression in fine grain OTN[J]. Optics Express, 2025, 33(4): 8027–8042.
- [15] Jing Ruiquan, Zhang Chengliang, Zhou Heng, et al. Innovation and demonstration of optical service unit-based metro-optimized OTN technologies[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2022, 14(4): 236–247.
- [16] ITU-T G.709 Interfaces for the optical transport network(OTN)[S/OL]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.709>.
- [17] Lin Shu, Costello D J. Error control coding [M]. 2nd ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2004: 676–680.
- [18] 北斗卫星导航系统介绍[EB/OL]. (2017-03-16)[2025-04-08]. http://www.beidou.gov.cn/xt/xtjs/201710/t20171011_280.html.
- [19] Yang Yuanxi, Mao Yue, Sun Bijiao. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system[J]. Satellite Navigation, 2020, 1(1): 1–8.